

Э. Д. ЧИХЛАДЗЕ (УкрГАЗТ, Харьков), Л. В. ГАПОНОВА (Харьковская национальная академия городского хозяйства)

## ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЛЕБЕТОННЫХ ПЛИТ

Проведена чисельна реалізація температурно-вологісних полів у сталобетонній плиті і виконано розрахунок вологісного режиму огорожуючих конструкцій при нестационарних умовах.

*Ключові слова:* вологісний режим, огорожуючі конструкції, нестационарні умови, сталобетонна плита

Проведена численная реализация температурно-влажностных полей в сталобетонной плите и выполнен расчет нестационарного влажностного режима современных ограждающих конструкций.

*Ключевые слова:* влажностный режим, ограждающие конструкции, нестационарные условия, сталобетонная плита

Numeral realization of temperature-humidity of the fields is conducted in a steel-concrete flag and the calculation of the non-stationary humidity mode of modern non-load-bearing constructions is executed.

*Keyword:* humidity mode, non-load-bearing constructions, non-stationary humidity, steel-concrete flag

### Актуальность исследований

В настоящее время широкое распространение получили сталобетонные плиты покрытий и перекрытий промышленных и гражданских зданий. Этому способствуют возможность использования внешней арматуры в качестве опалубки при монолитном способе возведения сооружений; совмещение функций рабочей арматуры с защитным ограждением; монтажа стыков элементов без дополнительных закладных деталей и выступающих частей; упрощения крепления различных коммуникаций и оборудования; понижения высоты элементов за счет отсутствия защитного слоя и компактного расположения арматуры.

Отмеченные конструкции имеют преимущество по сравнению с традиционными железобетонными. Это: простота в технологии изготовления; эффективное использование прочностных свойств. Однако тепловлажностные свойства сталобетонных конструкций исследованы недостаточно. Особенно с применением легких теплогидроизоляционных материалов.

Рекомендуемые в настоящее время в строительных нормах теплотехнические методы расчета ограждающих конструкций основаны на стационарных методах. Эти методы не в полной мере обосновывают влияние кратковременных климатических и других воздействий на изменение тепловлажностного состояния наружных ограждающих конструкций. Как следствие, при проектировании зданий и сооружений многие вопросы решаются на эмпирическом уровне.

Все сказанное обуславливает актуальность исследований в этой области.

### Цель и задачи исследования

1. Изучить распределение температур по толщине сталебетонной плиты 23 см, нагреваемой с одной стороны, и изучить скорость движения зоны испарения  $T = 100^\circ\text{C}$  по сечению сталебетонной плиты.

2. Выполнить расчет нестационарного влажностного режима современных ограждающих конструкций, рассмотрев сталобетонную плиту перекрытия, сочетающую в себе функции несущей и теплоизолирующей конструкции.

### Анализ исследований

Экспериментальные исследования огнестойкости бетонных конструкций показывают определяющую роль влажности бетона. В работах [1, 2] Э. Д. Чихладзе, А. И. Жакин, М. А. Веревичева рассмотрено влияние влажности на прочностные свойства бетона, проявляющееся в течение следующих двух процессов прогрева бетона. Первый процесс обусловлен испарением свободной воды. Этот процесс происходит при температуре бетона, не превышающей  $100^\circ\text{C}$ . На этапе испарения свободной влаги разрушение бетона может произойти за счет высокого внутрипорового давления. Согласно [1], растрескивание бетона начинается при выполнении условий

$$d\sigma/dt \geq [k_3/\eta_{\text{пара}}] [(p_{\text{max}} - p_0)/\Delta\sigma],$$

$$(\Pi/(1 - \Pi))(p_{\text{max}} - p_0) \geq R_{bt}, \quad (1)$$

где  $\eta_{\text{пара}}$  – коэффициент динамической вязкости пара.

Второй процесс связан с распадом молекул цементного камня при температурах 100...800 °С. Его результатом является выделение химически связанной воды. На этом этапе происходит разрушение бетона вследствие изменения его химической структуры, при температуре  $T_{\text{кр}} = 600$  °С происходит стопроцентная дегидратация СН и дегидратация 80 %  $\text{C}_{1,62}\text{SH}_{1,5}$ . Таким образом, эту температуру можно считать температурой разрушения бетона. Для оценки момента разрушения определялось время, за которое половина сечения плиты прогреется до 600 °С (как будет показано, треть сечения плиты за это время прогревается до температуры 800 °С).

Для применения этой методики необходимо уметь рассчитывать температурно-влажностные поля в плите. Опишем схему этих расчетов.

### Методика и результаты исследования

Поле распределения температур и влажности в сечении бетонной плиты из мелкопористого бетона, испытывающего односторонний нагрев, можно описать следующей краевой задачей ( $0 \leq x \leq \ell$ ):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_3}{\partial t} = \frac{\partial (j_3)}{\partial x}; \quad p = \rho_3 T R / (M \phi_3); \quad (3)$$

$$r < 10^{-7} \text{ м: } j_3 = -k_3 \partial (p / \sqrt{T}) / \partial x;$$

$$k_3 = (8/3) r \phi_3 \sqrt{M / 2 \pi R};$$

$$r \geq 10^{-7} \text{ м: } j_3 = -k_3 \rho_3 \partial (p) / \partial x;$$

$$k_3 = (8/3) r \phi_3 \sqrt{M / 2 \pi R};$$

$$t = 0: \quad \rho_3 = \rho_{30}, \quad T = T_0; \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} x = 0: \quad -\lambda \partial T / \partial x &= \alpha_f (T_f - T), \quad \rho_3 = \rho_f; \\ x = \ell: \quad \lambda \partial T / \partial x &= \alpha_c (T_0 - T), \quad \rho_3 = \rho_{30}; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$x = \sigma(t): \quad \left\{ \begin{aligned} -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} &= r_{t20} \frac{d\sigma}{dt}; \\ k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x_{|\sigma=0}} - k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x_{|\sigma=0}} &= \rho_{20} \frac{d\sigma}{dt}; \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где  $t$  – время;  $\rho$  – плотность сухого твердого каркаса;  $c$  – удельная теплоемкость бетона;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности сухого кар-

каса;  $T$  – температура твердого каркаса вместе с паром,  $K$ ;  $\rho_3$  – плотность пара в микропорах;  $p$  – давление пара в микропорах;  $k_3$  – коэффициент фильтрации пара по порам;  $j_3$  – массовая плотность потока пара по порам;  $M$  – молярная масса воды;  $R$  – газовая постоянная;  $r_t$  – удельная теплота парообразования;  $\alpha_f$  – коэффициент межфазного теплообмена между нагреваемой поверхностью и огневой средой;  $\alpha_c$  – коэффициент межфазного теплообмена между ненагреваемой поверхностью и холодной средой;  $T_f$  – температура огневой среды.

Преобразовав уравнение (3) с учетом (7), для  $\rho_3$  получим следующее уравнение:

$$\frac{\partial \rho_3}{\partial t} = \frac{8r}{3} \sqrt{\frac{R}{2\pi M}} \frac{\partial (\rho_3 \sqrt{T})}{\partial x}. \quad (8)$$

На нулевом, подготовительном этапе рассчитывается поле температур в сечении плиты до тех пор, пока температура нагреваемой поверхности не достигнет 100 °С.

С этого момента начинается первый этап расчета – определение поля температур в плите с учетом процессов испарения влаги и диффузии образовавшегося пара по микропорам, а также определение внутрипорового давления. Этап завершается, когда граница парообразования достигает ненагреваемой поверхности плиты, т.е. все сечение плиты прогревается не менее чем до 100 °С.

На втором этапе рассчитывается нагрев плиты, не содержащей свободной влаги. Для этого решается задача, учитывающая только теплопроводность.

Для численного исследования указанных процессов написана программа на языке ФОРТРАН [1]. Опишем разностную аппроксимацию задачи, реализованную в программе на каждом из указанных этапов расчета.

Поскольку при температуре бетона ниже 100 °С не происходит испарения и плотность пара в порах не изменяется, на этом этапе производится только расчет температурного поля в соответствии с уравнением теплопроводности

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad 0 \leq x \leq \ell \quad (9)$$

с начальными условиями

$$t = 0: \quad T(x, 0) = T_0 \quad (10)$$

и граничными условиями

$$\begin{aligned} x=0: \quad & -\lambda \partial T / \partial x = \alpha_f (T_f - T), \\ x=\ell: \quad & \lambda \partial T / \partial x = \alpha_c (T_0 - T). \end{aligned} \quad (11)$$

Осуществляется разностная аппроксимация уравнения (9) и краевых условий (10), (11). Отрезок  $0 \leq x \leq \ell$  разбиваем на  $n$  участков, каждый из которых содержит узел (рис. 1).

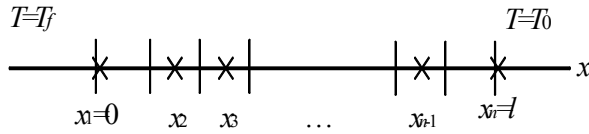


Рис. 1. Сеточное разбиение области  $0 \leq x \leq \ell$

Во внутренних точках области  $0 < x < \ell$ , т.е.  $1 < i < n$  разностная аппроксимация уравнения (9) выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} A_i T_{i+1} + B_i T_i + C_i T_{i-1} + D_i &= 0, \quad A_i = -1/R_{i+1}; \\ R_{i+1} &= (x_{i+1} - x_i) / \lambda_{i+1}; \quad B_i = c v_i \rho / \tau + 1/R_i + 1/R_{i+1}; \\ c v_i &= c_i \cdot (x_{i+1} - x_{i-1}) / 2; \\ C_i &= -1/R_i; \quad D_i = -c v_i \rho / \tau \cdot T_i^*, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $T_i$  – температура твердого каркаса в  $i$ -ом узле на текущем шаге по времени;  $T_i^*$  – температура твердого каркаса в  $i$ -ом узле на предыдущем шаге по времени (на нулевом шаге по времени  $T_i^* = T_0$ );  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности твердого каркаса в  $i$ -ом узле при температуре  $T^*$ ;  $c_i$  – удельная теплоемкость твердого каркаса в  $i$ -ом узле при температуре  $T_i^*$ ;  $\rho$  – плотность твердого каркаса;  $\tau$  – шаг разностной схемы по времени.

Эти уравнения дополняются уравнениями, аппроксимирующими краевые условия:

$$\begin{aligned} x=0: \quad & A_1 T_2 + B_1 T_1 + D_1 = 0; \\ x=\ell: \quad & B_n T_n + C_n T_{n-1} + D_n = 0; \quad A_1 = -1/r_2; \\ B_1 &= c v_1 / \tau + 1/r_2 + \alpha_f; \quad c v_1 = c_1 \cdot x_2; \\ D_1 &= -c v_1 \rho / \tau \cdot T_1^* - \alpha_f \cdot T_f; \\ B_n &= c v_n / \tau + 1/r_n + \alpha_c; \quad c v_n = c_n \cdot (x_n - x_{n-1}); \\ C_n &= -1/r_n; \quad D_n = -c v_n \rho / \tau \cdot T_n^* - \alpha_c \cdot T_0. \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, получена трехдиагональная система уравнений (12), (13), которая на каждом шаге по времени решается методом прогонки. Процесс осуществляется до тех пор, пока не выполнится условие  $T_1 = T_\varepsilon = 100$  °С. Время процесса обозначим через  $t_0$ , полученное в результате температурное поле обозначим че-

рез  $T^\circ$ . Это температурное поле используется в качестве начального при расчетах на следующем этапе.

Рассмотрим распределение температур по толщине сталебетонной плиты 23 см [3], нагреваемую с одной стороны, и изучим скорость движения зоны испарения  $T = 100$  °С по сечению сталебетонной плиты.

Пенобетон рассматривался плотностью  $\gamma = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma = 600$  кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma = 400$  кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma = 300$  кг/м<sup>3</sup> с влажностью 3 %, 10 %, 20 %, 60 %, 75 %.

Зависимость скорости движения зоны испарения  $T = 100$  °С от влажности пенобетона различной плотности, для рассматриваемого времени (50 мин), имеет одинаковый характер.

Для пенобетона плотностью  $\gamma = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, имеющий влажность 3 % граница испарения влажной области заканчивается на 0,09 м; при влажности 10 % – 0,060 м; при влажности 20 % – 0,047 м; при влажности 60 % – 0,027 м; тогда как при влажности 75 % граница испарения влажной области достигает 0,022 м.

Для пенобетона плотностью  $\gamma = 300$  кг/м<sup>3</sup>, имеющий влажность 3 % граница испарения влажной области заканчивается на 0,087 м; при влажности 10 % – 0,062 м; при влажности 20 % – 0,048 м; при влажности 60 % – 0,031 м; тогда как при влажности пенобетона 75 % граница испарения влажной области достигает 0,028 м (рис. 2).

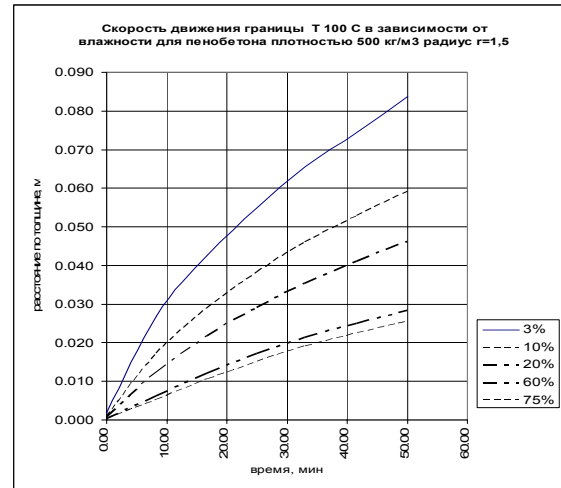


Рис. 2. Скорость движения границы 100 °С в зависимости от влажности для пенобетона плотностью 500 кг/м<sup>3</sup>

Темп прогрева сталебетонных плит различной плотности до температур выше 100 °С при одинаковой влажности мало отличается при влажности 3 % (рис. 3).

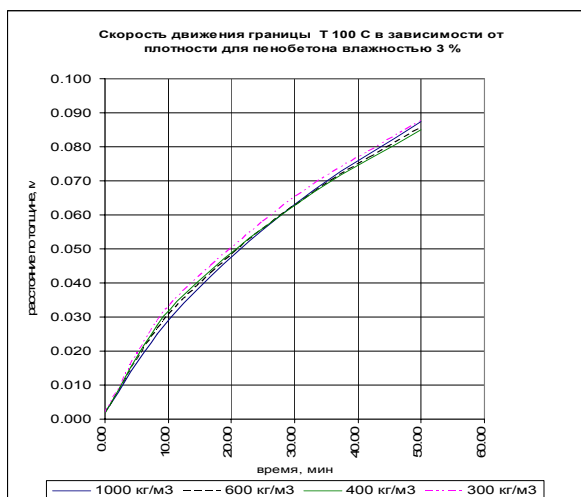


Рис. 3. Скорость движения границы 100 °С в зависимости от плотности для пенобетона влажностью 3 %

При влажности пенобетона, составляющей 20 % распространение перехода границы фаз составляет 0,045...0,047 м для плотности пенобетона 1000 кг/м<sup>3</sup> до 300 кг/м<sup>3</sup> соответственно (рис. 4).

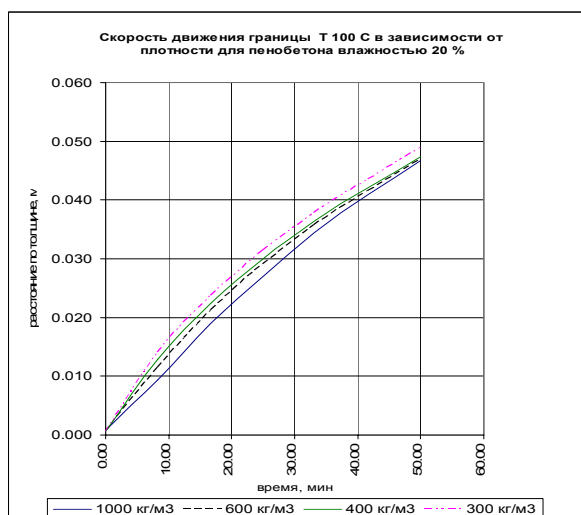


Рис. 4. Скорость движения границы 100 °С в зависимости от плотности для пенобетона влажностью 20 %

С увеличением влажности до 75 % распространение перехода границы фаз составляет 0,023 м для плотности пенобетона 1000 кг/м<sup>3</sup>, когда для пенобетона плотностью  $\gamma = 300$  кг/м<sup>3</sup> распространение перехода границы фаз составляет 0,027 м (рис.5).

Таким образом, численные исследования температурно-влажностных полей показывают, что зависимость скорости движения зоны испарения  $T = 100$  °С от влажности пенобетона различной плотности, для рассматриваемого времени (50 мин), имеет одинаковый характер.

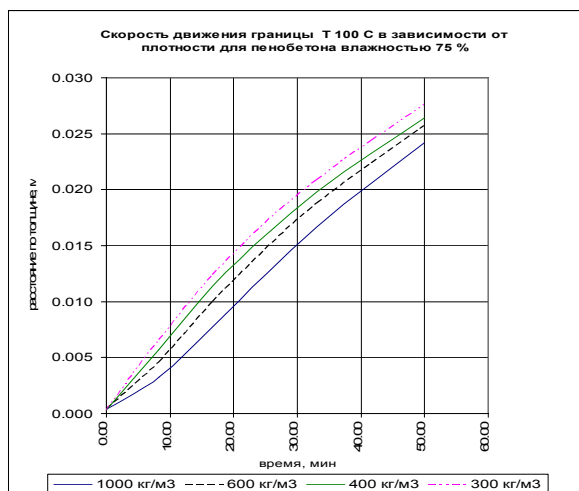


Рис. 5. Скорость движения границы 100 °С в зависимости от плотности для пенобетона влажностью 75 %

Увеличение плотности пенобетона ведет к снижению темпа распространения границы фазового перехода.

Применим методику, предложенную К. Ф. Фокиным [4], и выполним расчет нестационарного влажностного режима современных ограждающих конструкций. Рассмотрим сталебетонную плиту перекрытия [3], сочетающую в себе функции несущей и теплоизолирующей конструкции. Плита включает многопустотную пенобетонную плиту, армированную стальной мембраной, расположенной в нижнем поясе плиты.

Дифференциальное уравнение для диффузии водяного пара имеет следующий вид:

$$\frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\mu}{\xi \gamma} \cdot \frac{\partial^2 e}{\partial x^2}, \quad (14)$$

где  $e$  – упругость водяного пара;  $\mu$  – коэффициент пароемкости материала;  $\xi$  – удельная пароемкость материала.

Для определенного значения относительной упругости водяного пара величина относительной пароемкости материала будет:

$$\xi_0 = \frac{d\omega}{d\phi} 1000, \quad \xi = \frac{\xi_0}{E}, \quad (15)$$

где  $E$  – максимальная упругость водяного пара, соответствующая температуре  $t$ .

Рассмотрена общая формула для определения упругости водяного пара в любой плоскости через интервал времени  $\Delta Z$  по упругостям в этой же плоскости и в двух соседних плоскостях в предыдущий момент (16, 17).

$$\frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\mu}{\xi_0 \gamma} E_t \frac{\partial^2 e}{\partial x^2}; \quad (16)$$

$$\frac{\Delta e}{\Delta Z} = \frac{\mu}{\xi_0 \gamma} E_t \frac{\Delta^2 e}{\Delta x^2}. \quad (17)$$

Расчет изменения упругости водяного пара во времени сводится к последовательному вычислению упругостей во всех плоскостях стенки через равные интервалы времени  $\Delta Z$  (18, 19)

$$e_{n,z+1} = e_{n,z} + \frac{\mu}{\xi_0 \gamma} E_t \frac{\Delta Z}{\Delta x^2} (e_{n+1,z} - 2e_{n,z} + e_{n-1,z}) \quad (18)$$

$$\Delta e_0 = \frac{2\Delta Z}{\Delta x \gamma \xi_0} E_0 \left( \frac{e_s - e_{0,z}}{R_{s,n}} - \frac{e_{0,z} - e_{1,z}}{R_{\Delta n}} \right). \quad (19)$$

где  $\Delta e_0$  – изменение упругости водяного пара на поверхности, граничащей с воздухом, за время  $\Delta Z$  в мм. рт. ст.;  $E_0$  – максимальная упругость водяного пара на этой поверхности в мм. рт. ст.

$$e_{0,z+1} = \frac{R_{\Delta n} e_s + R_{s,n} e_{1,z}}{R_{s,n} + R_{\Delta n}} \quad (20)$$

В табл. 1 и 2 помещены исходные данные для расчета влажностного режима современных ограждающих конструкций при нестационарных условиях и приведены типы ограждающих конструкций температурно-влажностный режим которых изучался.

Таблица 1

Типы ограждающих конструкций

Наружная ограждающая конструкция	Чердачная плита перекрытия	Предложенная многопустотная сталебетонная плита
		
1 – профилированный лист; 2 – утеплитель PANELROCK; 3 – кирпич полнотелый	1 – утеплитель SUPERROCK; 2 – железобетонное перекрытие	1 – утеплитель SUPERROCK; 2 – сталебетонная пустотная плита перекрытия

Таблица 2

Климатические расчетные данные для г. Харькова

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Средняя
Относительная влажность	84	83	81	68	60	64	66	64	70	77	86	87	74
Температура наружного воздуха	-7	-5,7	-0,3	8,9	15,6	19,0	20,4	19,5	14,1	7,3	1,3	-3,3	7,5
Средняя расчетная влажность	5,65	5,6	5,29	4,52	4,03	3,95	3,93	3,94	4,23	4,78	5,29	5,53	4,72

Сезонное изменение влажности в сталебетонной плите описывается следующей функцией:

$$y = a + b \cdot \cos(ca + d), \quad (21)$$

где  $a = 4,728$ ;  $b = 0,948$ ;  $c = 0,523$ ;  $d = -0,449$  – постоянные коэффициенты.

## Выводы

1. Проведенные численные исследования температурно-влажностных полей позволяют сделать вывод, что зависимость скорости движения зоны испарения  $T = 100$  °С от влажности пенобетона различной плотности, для рассматриваемого времени (50 мин), имеет одинаковый характер.

2. Увеличение плотности пенобетона ведет к снижению темпа распространения границы фазового перехода.

3. Выполненные расчеты сезонного распределения влажности в сталебетонной плите при нестационарных условиях показывают, что изменение влажности не превышает допустимых пределов – 6 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чихладзе, Э. Д. Огнестойкость бетонных и сталебетонных конструкций [Текст] / Э. Д. Чихладзе, А. И. Жакин, М. А. Веревичева. – Х.: ХарДАЗТУ, 2000. – Вып. 40. – 97 с.
2. Жакин, А. И. Теория тепломассообмена в пористых средах [Текст] / А. И. Жакин, Э. Д. Чихладзе, М. А. Веревичева // Изв. ВУЗов. Строительство. – 1998. – № 1. – С. 111-116.
3. Гапонова, Л. В. Компьютерные исследования теплофизических свойств сталебетонных плит [Текст] / Л. В. Гапонова // Наукові нотатки: міжвуз. зб. за напрямом Інженерна механіка. – Луцьк: ЛНТУ. – Вип. 25, Ч. 1. – С. 83-88.
4. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий [Текст] / К. Ф. Фокин. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.

Поступила в редколлегию 17.05.2011.

Принята к печати 25.05.2011.